

Limiteur supraconducteur de courant de défaut pour l'avion électrique

Pascal TIXADOR, Amaury MARTIN, Arnaud BADEL

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble-INP, Institut Néel, G2Elab – 38000 Grenoble, France

Pedro BARUSCO, Edwin CALDERON, Emelie NILSSON

Airbus UpNext SAS – 31300 Toulouse, France

RESUME -la supraconductivité est une technologie habilitante pour l'avion électrique en apportant légèreté et compacité. Elle offre en plus la fonction de limitation des courants de défaut particulièrement élevés dans un réseau avionique. Nous avons dimensionné un limiteur supraconducteur de courant de défaut 400 V / 1500 A adapté au projet CRYOPROP d'Airbus via des simulations numériques. Nous sommes partis de supraconducteurs disponibles (rubans REBCO) pour déterminer la longueur nécessaire. Nous avons étudié l'influence de l'inductance en série avec le limiteur ; elle est réduite. Un modèle expérimental est en cours de conception et de réalisation. Il est basé sur la circulation d'hélium à 40 K refroidi par un cryo-réfrigérateur Gifford MacMahon. Le limiteur utilise une bobine bifilaire en couche.

Mots-clés – Avion électrique, Supraconductivité, Limiteur de courant, Réseau électrique avionique

1. INTRODUCTION

L'aviation doit se décarboner et atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Une solution est l'avion électrique [1]. La supraconductivité apporte non seulement la légèreté, indispensable aux composants électriques, mais aussi des fonctions nouvelles comme la limitation des courants de défaut, objet de cet article. Parallèlement, les rubans supraconducteurs REBCO à haute température critique ont atteint récemment (années 2020) un stade industriel [2]. Ces conducteurs conviennent en général très bien aux applications visées pour l'avion électrique. Le réseau DC électrique envisagé conduit à des courants prospectifs de défaut extrêmement élevés, de plusieurs dizaines de kA. Une solution naturelle dès lors que des supraconducteurs sont déjà utilisés, est le limiteur supraconducteur de courant de défaut, notamment résistif, connu sous son acronyme anglais rSFCL (resistive Superconducting Fault Current Limiter). Il est basé sur la propriété intrinsèque d'un élément supraconducteur de perdre instantanément son état non dissipatif pour devenir très dissipatif, dès que son courant critique est dépassé. Le rSFCL est un composant déjà bien développé, notamment pour les réseaux électriques terrestres, mais l'aéronautique apporte de nouvelles contraintes à étudier, notamment un refroidissement par du gaz hélium à 40/50 K.

Quelques travaux ont déjà été menés dans le domaine [3, 4], mais sans expérimentation dans l'hélium gaz.

Nous allons tout d'abord exposer le cahier des charges auquel doit répondre le rSFCL dans le cadre du projet CRYOPROP d'Airbus UpNext [5].

2. CAHIER DES CHARGES

Le tableau 1 rassemble les caractéristiques principales du SFCL du projet CRYOPROP d'Airbus UpNext.

Tableau 1. Caractéristiques du rSFCL de CRYOPROP (Airbus UpNext).

Grandeur	Valeurs des paramètres
Tension assignée	400 V
Courant assigné	1500 A
Courant de court-circuit maximum	20 kA
Temps d'isolation du défaut	100 ms
Courant crête limité admissible	5 kA
Fluide de refroidissement, température	He gazeux, 40 - 50 K
Supraconducteur	Ruban REBCO

La figure 1 représente très schématiquement, un ruban supraconducteur REBCO, qui est le conducteur à haute température critique ($T_c = 90$ K) actuel le plus développé [2]. RE représente une Terre Rare (Y, Gd, Sm) et BCO : BaCuO. Le supraconducteur REBCO est une très fine couche (2-4 μm) déposée sur un substrat épais en Hastelloy® à travers des couches tampon et entourée de différents matériaux en général conducteurs. Le stabilisateur « fonctionnalise » le ruban REBCO ; il est plus ou moins complexe.

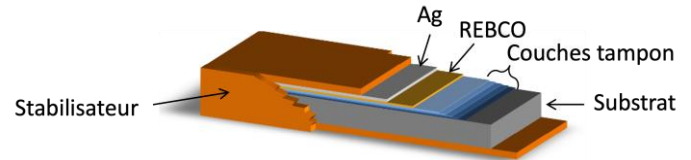


Fig. 1. Ruban REBCO (schéma non à l'échelle).

Nous avons dimensionné le limiteur répondant au cahier des charges (tableau 1) en considérant des rubans (tableau 2) disponibles sur le marché sauf pour le ruban AMSC qui n'est plus produit, mais qui était dédié au rSFCL.

Tableau 2 : Rubans REBCO utilisés pour les dimensionnements.

Fournisseurs	SST 14 [6]	Fujikura [7]	AMSC [8]	Theva [9]
Largeur tot.	12 mm	12 mm	12 mm	12 mm
Substrat : matériaux / épaisseurs	Hastelloy 50 μm	Hastelloy 75 μm	Non renseignée	Hastelloy 100 μm
Stabilisateur : matériaux et épaisseurs	SS316 (160 μm) Cu (10 μm) PbSn (16 μm)	Aucun	Inox 150 μm	Aucun
Epaisseur Ag	2 μm	2 μm	Non renseignée	2 μm
I_c (45 K)	1880 A	1720 A	2000 A	1970 A
Epaisseur tot.	240 μm	80 μm	330 μm	110 μm
R_t (300 K)	100 m Ω /m	460 m Ω /m	70 m Ω /m	230 m Ω /m

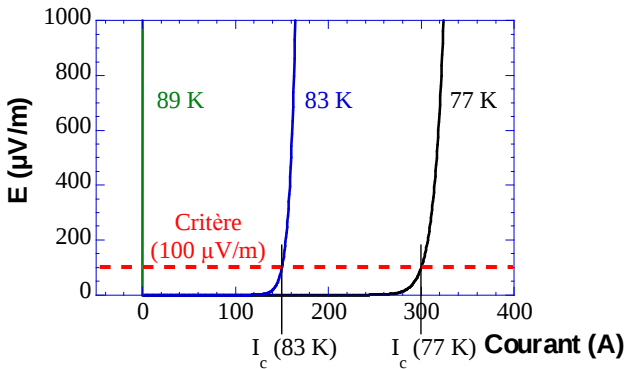
Le courant critique à 45 K (I_c (45 K)) est extrapolé de la valeur à 77 K en supposant une variation linéaire entre le courant critique et la température avec une température critique de 92 K.

Nous allons décrire la méthode et le modèle assez classique utilisés pour dimensionner le rSFCL [10, 11]. Nous considérons un modèle dit « mono-bloc », c'est-à-dire homogène sur la longueur du supraconducteur. Ce modèle est pertinent pour étudier le régime de limitation considéré puisque le courant prospectif est nettement supérieur au courant critique du ruban.

En revanche ce modèle ne serait pas valide pour un défaut impédant, il faudrait utiliser un modèle dit « multi-blocs » [11]. Une étude simplifiée d'un défaut impédant sera traitée dans le paragraphe 4.2.

3. MODELE ELECTROTHERMIQUE DU RSFCL

Le rSFCL étudié est basé sur la caractéristique intrinsèque $E(I)$ (E : champ électrique; I : courant) du ruban REBCO. La Fig. 2 montre un exemple de quelques caractéristiques à différentes températures. E_c est le champ électrique qui définit le courant critique $I_c(T)$ ($E_c = 100 \mu\text{V/m}$ (standard international)). Compte tenu de la forte dissipation (EJ), dès que le courant dépasse la valeur critique à la température initiale T_0 , la température croît rapidement et les caractéristiques pour $T > T_0$ sont décrites. La caractéristique devient linéaire dès que la température dépasse la valeur critique T_c (89 K (Fig. 3)).

Fig. 2. Exemple de caractéristiques $E(I)$ d'un conducteur supraconducteur.

La Fig. 3 donne en dessous de la température critique le modèle pour une longueur L : il comporte deux branches en parallèle, une supraconductrice et l'autre normale.

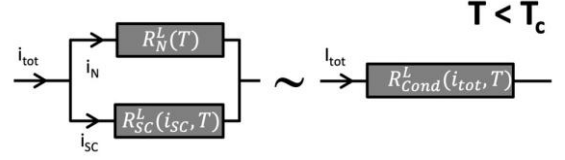


Fig. 3. Représentation de la résistance par unité de longueur d'un ruban supraconducteur en fonction de la température.

$R_N^L(T)$ est la résistance linéique du conducteur à l'état normal extrapolée à la température T . $R_{SC}^L(i_{SC}, T)$ est la résistance linéique fortement non linéaire de la couche supraconductrice extrapolée par une loi de puissance (n : indice de transition de résistivité) :

$$R_{SC}^L(i_{SC}, T) = \frac{E_c}{I_c(T)} \left(\frac{|i_{SC}|}{I_c(T)} \right)^{n(T)-1} \quad (1)$$

Nous avons considéré un $n(T)$ variable en fonction de la température avec 40 comme valeur moyenne dans la plage 45 K – 90 K.

Au-dessus de la température critique, la branche supraconductrice disparaît et il ne reste que la résistance à l'état normal $R_N^L(T)$ dépendant uniquement de la température.

Le régime en dessous de la température critique est plus important que pour un rSFCL pour réseau terrestre qui fonctionne en général dans l'azote liquide (65–77 K). Un rSFCL avionique fonctionne entre 40 et 50 K.

Ce modèle est inséré dans le schéma électrique simplifié présenté par la Fig. 4. La résistance $R(t)$ est extrapolée à partir du courant prospectif et de la tension d'alimentation (400 V). L'inductance L_r est celle du circuit et du rSFCL.

Il faut associer aux équations de circuit électrique une équation thermique pour connaître l'évolution de la température (T). On suppose que le conducteur est isotherme dans sa section (S) et qu'il n'échange pas avec l'extérieur (adiabatique) ; les échanges avec le gaz sont limités. L'équation qui donne l'évolution de la température T est donc :

$$c_p(T) S L \frac{dT}{dt} = v_{rSFCL}(t) i(t)$$

C_p : chaleur spécifique par unité de volume
 L : longueur du ruban

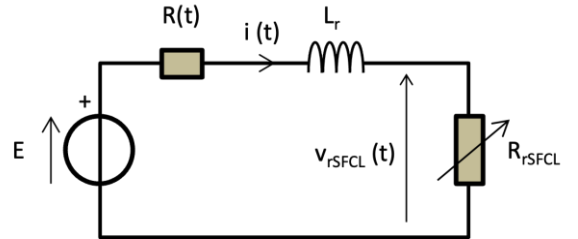


Fig. 4. Circuit électrique dans lequel est étudié le SFCL.

4. DIMENSIONNEMENT DU RSFCL

4.1. Longueur du ruban (L)

Comme le ruban est fixé, le dimensionnement consiste à déterminer sa longueur pour que sa température reste « raisonnable » lorsque le rSFCL est isolé après le défaut (100 ms (tableau 1)). La température maximale atteinte ne doit pas dégrader le ruban, 300 K à 400 K sont les valeurs

généralement considérées. Le ruban que nous allons utiliser contient de la soudure PbSn dont la température de fusion est de 456 K.

La Fig. 5 montre le courant de court-circuit en fonction du temps pour une longueur de 7 m des différents rubans (Tableau 2) avec un zoom aux premiers instants (Fig. 6). Les ruptures de pente du courant correspondent au moment où la température critique est atteinte. Le tableau 3 donne le courant crête pour les différents rubans. L'inductance L_r est de 1 μ H.

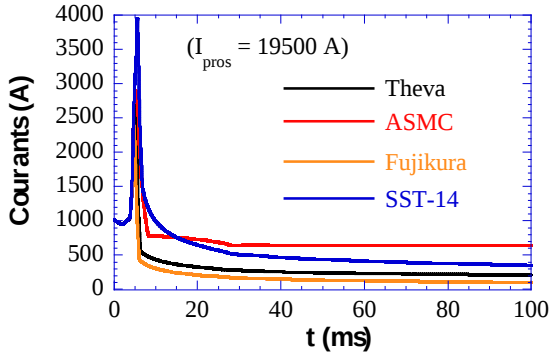


Fig. 5. Courant de court-circuit pour les différents rubans ($L_r = 1 \mu\text{H}$; $L = 7 \text{ m}$).

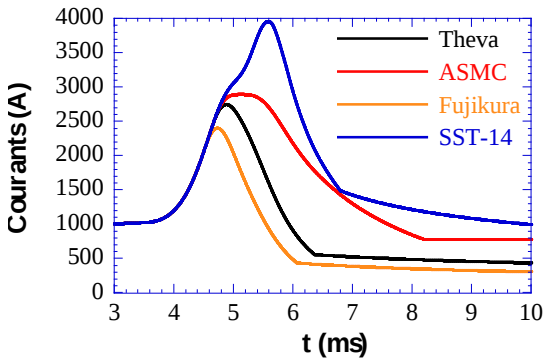


Fig. 6. Courant de court-circuit pour les différents rubans avant 10 ms.

Tableau 3. Courant crête pour les différents rubans ($L_r = 1 \mu\text{H}$; $L = 7 \text{ m}$).

	SST 14	Fujikura	AMSC	Theva
$I_{\text{crête}}$	3900 A	2600 A	2900 A	2900 A

La Fig. 7 présente l'évolution de la température des rubans au cours du temps. Le tableau 4 montre que tous les rubans respectent le critère de température maximale.

Tableau 4. Température maximale pour les différents rubans ($L_r = 1 \mu\text{H}$; $L = 7 \text{ m}$).

	SST 14	Fujikura	AMSC	Theva
T_{max}	310 K	309 K	276 K	339 K

4.2 Régime de « hot spot » (point chaud)

Même si la tenue du ruban à un défaut impédant n'est pas dans le cahier des charges, nous avons étudié ce cas. Ce régime est appelé aussi régime de hot spot (point chaud [11]). Le courant critique varie le long d'un ruban supraconducteur. Si la variation peut être réduite, elle ne peut pas être nulle : il existe donc un point le long du ruban qui montre un courant critique minimum. Dans le cas où le défaut impédant conduit à ce courant critique minimum, seul ce point devient dissipatif et

chauffe d'où la dénomination de « point chaud ». La structure du ruban avec des matériaux de faible conductivité thermique fait qu'un point chaud se propage très peu avant l'isolation du circuit (100 ms dans notre cas). Par ailleurs, comme ce point chaud est et reste petit, sa résistance est négligeable par rapport à l'impédance du défaut : la source se comporte par conséquent comme une source de courant. C'est pourquoi nous avons étudié l'évolution temporelle de la température (Fig. 8) en supposant une source de courant d'amplitude $1,2 I_c$ en supposant un point chaud avec un courant critique de $0,8 I_c$. Ce sont des valeurs classiques pour étudier le régime de point chaud

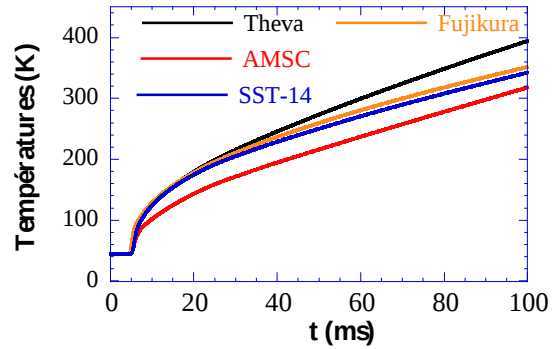


Fig. 7. Évolution de la température au cours du temps pour chaque ruban.

Les rubans Fujikura et Theva sont rapidement détruits. Le SST14 tolère un peu mieux le régime de hot spot, mais se dégrade après environ 6 ms ($T = 400 \text{ K}$). Cette durée monte à 12 ms pour le ruban AMSC.

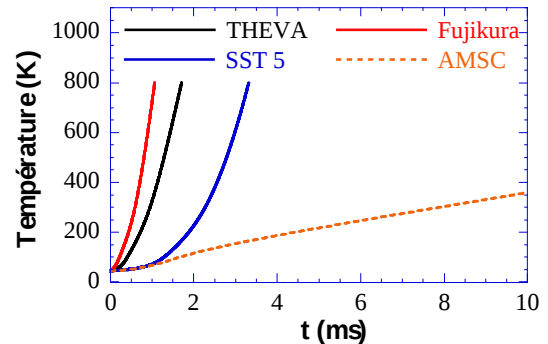


Fig. 8. Température en régime de hot spot pour les différents rubans.

Cette relative tenue au régime de point chaud du ruban SST14 par rapport aux deux autres rubans disponibles fait que nous avons retenu ce ruban pour le modèle expérimental. Il limite bien le courant à moins de 5000 A (cahier des charges).

Si ce ruban SST14 convient, il n'est pas optimum. Ce ruban est dédié au rSFCL. Il comprend un ruban REBCO de 10 mm de large avec très peu de cuivre ($2 \times 5 \mu\text{m}$) entre deux rubans d'acier inoxydable (316) recouvert de PbSn. Ces rubans font $80 \mu\text{m}$ d'épaisseur et 12 mm de large. Le tout est soudé avec du PbSn. Un ruban avec un stabilisateur mieux adapté pourrait réduire la longueur tout en validant le régime de point chaud.

Nous avons retenu un ruban SST 14 [12] avec un courant critique est de 650 A (77 K, sf (champ propre)). A 40 K, sf, le courant critique doit atteindre 2000 A. Nous avons mesuré 670 A à 77 K, en champ propre (Fig. 9). L'indice de transition

résistive (« n ») mesuré vaut 19. La Fig. 10 montre l'influence de la longueur pour ce ruban concernant le courant crête et la température maximale à 100 ms. Ces deux grandeurs diminuent logiquement avec la longueur du ruban. Cependant, l'influence de la longueur sur le courant crête est modérée. La longueur retenue est de 7 m ($I_{max} = 3900$ A et $T_{max} = 340$ K). La valeur de 340 K pour la température se veut conservatrice.

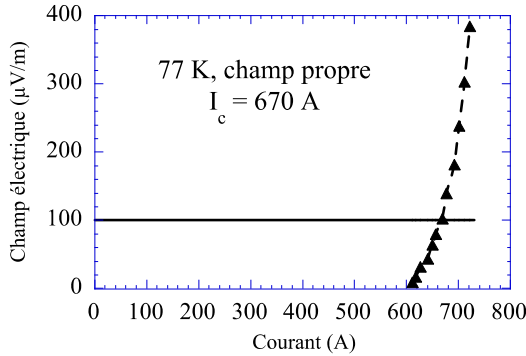


Fig. 9. Mesure du courant critique du ruban retenu pour le rSFCL ; courant champ électrique en fonction du courant, 77 K, sf (self field (champ propre)).

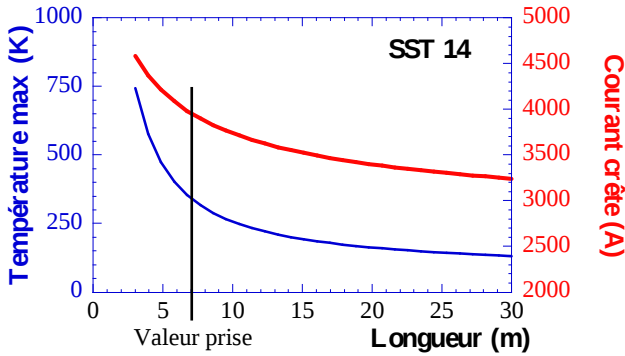


Fig. 10. Évolution du courant crête et de la température maximale pour plusieurs longueurs de rubans.

4.3 Influence de l'inductance et de la résistance interne

La Fig. 11 donne l'influence de l'inductance L_r (Fig. 4) en termes de courant crête et de température maximale respectivement pour les rubans SST14 et AMSC. L'influence jusqu'à 1 μ H est très modérée. A partir de 10 μ H, le courant crête et la température maximale augmentent légèrement.

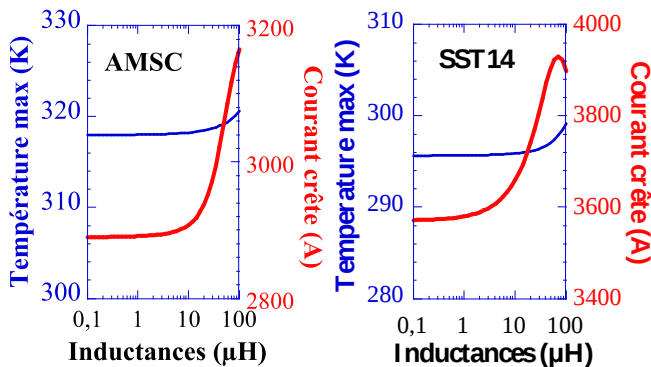


Fig. 11. Évolution du courant et de température maximale en fonction de l'inductance du circuit pour les rubans SST14 et AMSC.

Nous avons aussi étudié l'influence de la résistance interne $R(t)$ (Fig. 4). La Fig. 12 montre l'influence de cette résistance

supposée ici constante avec le ruban SST14 sur le courant crête et la température maximale pour une inductance L_r de 1 μ H. Cette résistance joue un rôle en particulier pour le courant crête et les résultats dépendent de la valeur de l'inductance L_r . Cette étude montre que le courant crête ne peut pas dépasser 7000 A pour une puissance de court-circuit infinie et une inductance L_r de 1 μ H.

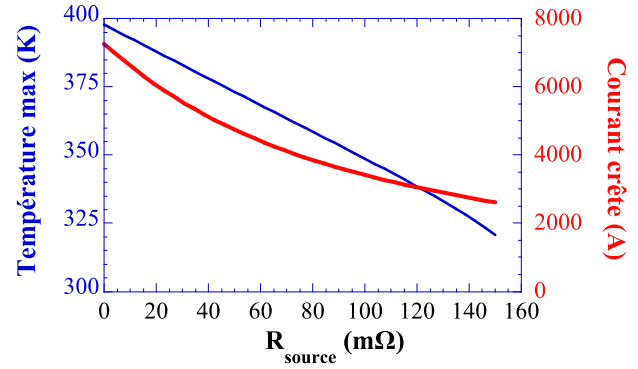


Fig. 12. Évolution du courant crête et de la température maximale en fonction de la résistance interne avec le ruban SST14.

5. ELEMENT SUPRACONDUCTEUR

Les composants avioniques devant être légers et compacts, les configurations conventionnelles de galettes bifilaires de rSFCL [13] ne sont pas adaptées : il faut favoriser une solution de type solénoïde. Le limiteur NbTi développé par Alstom et EDF [14] consistait en deux solénoïdes bobinés en sens inverse et connectés aux deux extrémités. Cette solution présente en plus une excellente tenue diélectrique (entre les deux extrémités des solénoïdes). En revanche comme nous sommes en DC, la répartition des courants dans les deux solénoïdes dépend des résistances de contact et ce n'est pas trivial qu'elles soient très proches. Nous avons retenu la solution d'un bobinage en couche bifilaire : deux rubans parcourus par des courants en sens opposés sont bobinés en couches (Fig. 13). Les deux rubans sont placés dans des gorges dans un mandrin. Les espaceurs sont des rubans isolants ondulés pour faciliter le refroidissement. Le « retournement » du ruban est fait à une extrémité du bobinage via une lyre et les connexions sont à l'autre extrémité. Comme pour toute configuration bifilaire, les conditions électromagnétiques sont homogènes sur la longueur sauf aux extrémités. Cette homogénéité est très favorable à une transition du ruban sur toute sa longueur. En revanche la tenue diélectrique n'est pas favorable puisque la pleine tension se retrouve entre les deux rubans proches coté connexions. Ce sera un point de vigilance d'autant que nous serons dans l'hélium gaz qui est un piètre isolant en particulier à température ambiante ce qui est le cas au moment de l'isolation après un court-circuit.

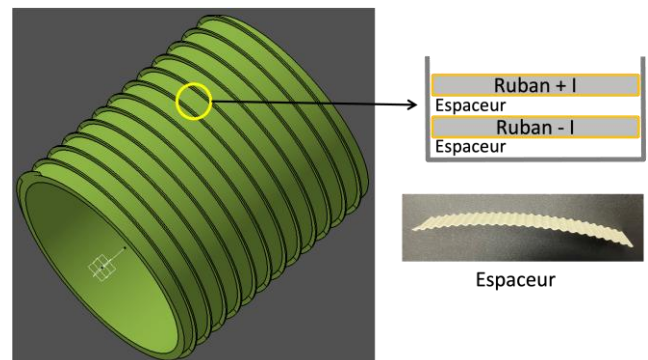


Fig. 13. Enroulement bifilaire en couche pour le rSFCL.

La figure 14 représente la distribution de l'induction magnétique dans l'élément supraconducteur avec l'hypothèse axisymétrique justifiée. Il s'agit de l'induction magnétique pour les deux rubans (courants opposés) au centre de la bobine et à une extrémité. Les distances axiale et radiale entre les rubans sont les mêmes : 5 mm. L'étude de l'influence de ces deux distances indique que la distance radiale joue un rôle prépondérant. L'induction magnétique reste bien confinée entre les deux rubans et ils voient tous pratiquement la même distribution magnétique. La hauteur considérée pour les rubans est 10 mm car le REBCO n'est pas sur toute la largeur du ruban (12 mm), mais seulement sur 10 mm.

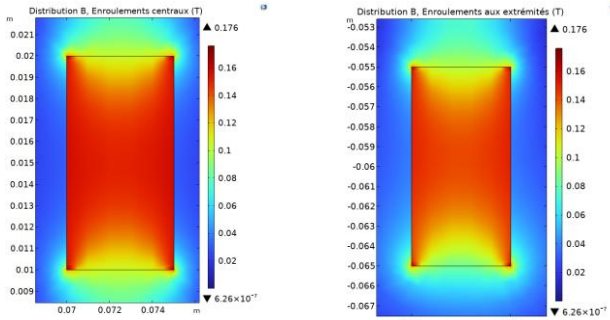


Fig. 14. Répartition de l'induction magnétique dans l'élément limiteur au centre (à gauche) et à une extrémité (à droite).

6. MODELE EXPERIMENTAL

Un modèle expérimental (400 V - 1500 A) est en cours de conception et sera construit avec le ruban SST14 pour valider et qualifier les choix technologiques retenus. Il sera refroidi par une boucle fermée d'hélium gazeux pressurisé refroidi. Ce modèle devrait être intégré dans la boucle d'AIRBUS Up Next. La bobine en couche bifilaire n'est pas refroidie directement par l'hélium sous pression, mais de l'hélium autour de la pression atmosphérique via un échangeur. Cela évite une enceinte « haute » pression qui serait lourde.

Pour faire les essais préliminaires à Grenoble, le montage expérimental (Fig. 15) comprendra en plus du bloc « élément supraconducteur », un bloc « production de gaz He à 40/50 K » et un bloc « Connexions électriques à 300 K ».

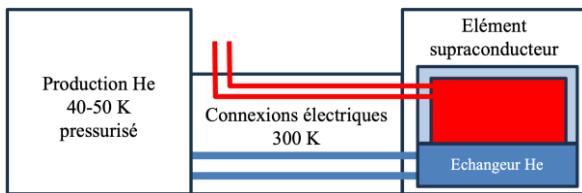


Fig. 15. Les trois blocs pour les essais du rSFCL à Grenoble.

La production d'hélium pressurisé à basse température (40/50 K) est faite à travers un échangeur refroidi par un cryo-réfrigérateur Gifford MacMahon et un circulateur froid (Fig. 16). Compte tenu du cryo-réfrigérateur nous disposons d'une puissance très confortable (125 W à 40 K).

Le bloc « Connexions électriques à 300 K » comprend principalement deux amenées de courant 1500 A (fig. 17) qui relie l'élément supraconducteur au circuit extérieur. Compte tenu du courant et de la nécessité de réduire les apports thermiques au bloc « élément supraconducteur », l'amenée de courant est refroidie par une circulation d'azote liquide et optimisée [15]. Le bas de l'amenée de courant (coté élément

rSFCL) est un réservoir d'azote liquide en cuivre. La partie entre ce réservoir et le circuit extérieur est un tube en laiton refroidi par l'azote gazeux. Le laiton présente de meilleures performances en termes de compacité et de pertes à vide, lorsque le rSFCL n'est pas alimenté.

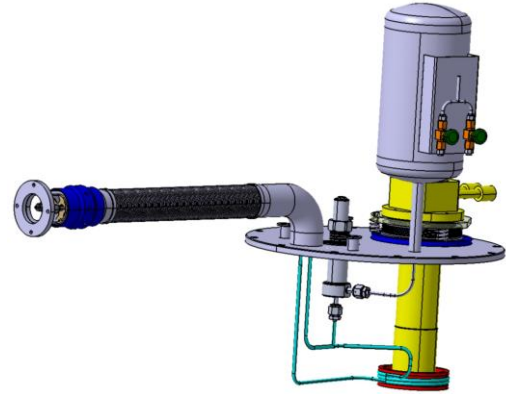


Fig. 16. Bloc production d'hélium gaz pressurisé 40/50 K.

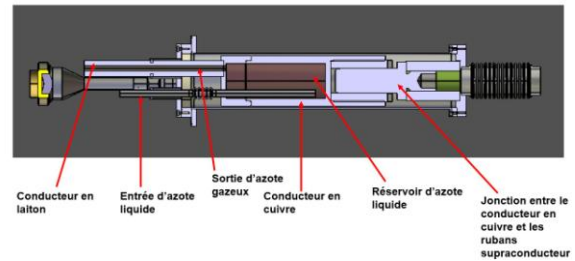


Fig. 17. Amenée de courant 1500 A entre 77 K et 300 K refroidie par de l'azote liquide.

7. CONCLUSIONS

Un rSFCL est un élément clé pour la protection du réseau DC de l'avion électrique du futur. Des simulations numériques ont permis d'optimiser un rSFCL répondant aux contraintes du réseau de bord du projet CRYOPROP (400 V, 1500 A) avec 7 mètres de ruban REBCO disponible (SST 14) (I_c (77 K, sf.) = 650 A) fonctionnant dans du gaz hélium à 40/50 K. Le courant prospectif de 20 kA est limité à 3,9 kA. Pour valider les contraintes aéronautiques de refroidissement pas gaz, nous développons un premier modèle expérimental. Les 7 mètres de ruban sont arrangés sous forme de bobine bifilaire en couche. Ce premier modèle n'est vraiment pas optimisé en termes de poids et de volume.

8. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient T. Gandit, C. Bruyere, P. Camus et J. Vessaire pour la conception du système expérimental. Les auteurs remercient aussi A. Zampa pour les échanges sur le modèle numérique.

9. REFERENCES

- [1] E. Nilsson, J. Rivenc, J.F. Rouquette, M. Tassisto, C. Fallouh, L. Ybanez, A. Delarche, F. Berg, S.A. Dönges, J. Weiss, K. Radcliff, D.C. van der Laan, S. Otten, M. Dhallé, H. ten Kate, "Design of the Superconducting AC and DC Distribution for the ASCEND Demonstrator at Airbus", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 33, Art no. 5401006, (2023).
- [2] A. Molodyk, D. Larbalestier, "The prospects of high-temperature superconductors", *Science*, 380 (2023) 1220-1222.
- [3] R. Oliveira, X. Pei, E. Nilsson, L. Ybanez, X. Zeng, "Performance Analysis of Resistive Superconducting Fault Current Limiter Using LN2

- and GHe cooling”, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 33, Art no. 5600306, (2023), doi : 10.1109/TASC.2023.3237642.
- [4] L. N. Nguyen, D. Vo, J. Weiss, S. A. Dönges, F. Grilli, D. van der Laan, S. V. Pamid and D. N. Nguyen, “Simulations of the fault current limiting operation of a long-length REBCO CORC® superconducting cable cooled by helium gas”, *Superconductor Science and Technology*, 2025, in press, <https://doi.org/10.1088/1361-6668/addb88>.
- [5] <https://www.airbus.com/en/innovation/innovation-ecosystem/airbus-upnext>.
- [6] <http://www.shsctec.com>
- [7] <https://www.fujikura.co.uk/products/f>
- [8] <https://www.amsc.com/gridtec/amperium-hts-wire/>
- [9] <https://www.theva.com>
- [10] P. Tixador et A. Badel, “Superconducting Fault Current Limiter optimized design”, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 518, p. 130-133, nov. 2015, doi : 10.1016/j.physc.2015.06.007.
- [11] A. Zampa, “Experimental and numerical study of 2G HTS tapes to develop high-performance R-SFCL conductors”, PhD, Université Grenoble Alpes, 2021.
- [12] J. Zhu, Y. Zhao, S. Chen, S. Zhen, C. Zhang, B. Song, J. Sheng, W. Wu, Z. Jin, “Lamination Process of Second Generation High Temperature Superconducting Tape at Shanghai Superconductor Technology”, *Materials Today Communications*, vol. 31, 103721 (2022).
- [13] H. P. Kraemer, A. Bauer, M. Frank, P. van Haselt, P. Kummeth, M. Wholfart, C. Schacherer, T. Arndt, T. Janetschek, “ASSiST - A Superconducting Fault Current Limiter in a Public Electric Power Grid”, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 37, pp. 612-618, 2023.
- [14] T. Verhaege, C. Cottevieille, P. Estop, M. Quemener, J.P. Tavergnier, M. Bekhaled, C. Bencharab, P. Bonnet, Y. Laumond, V.D. Pham, C. Pomarede, P.G. Therond, “Experiments with a high voltage (40 kV) superconducting fault current limiter”, *Cryogenics*, vol. 36, pp. 521-526, 1996.
- [15] H. G. Lee, H. M. Kim, B. W. Lee, I. S. Oh, H. R. Kim, O.B. Hyun, J. Sim, H. M. Chang, J. Bascunan, Y. Iwasa, “Conduction-Cooled Brass Current Leads for a Resistive Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) System”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, n°2, p. 2248-2251, juin 2007, doi : 10.1109/TASC.2007.898146.